



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116279409 A

(43) 申请公布日 2023. 06. 23

(21) 申请号 202310094091.9

(22) 申请日 2023.02.03

(71) 申请人 同济大学

地址 200092 上海市杨浦区四平路1239号

(72) 发明人 陈虹 刘行行 张琳

(74) 专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225

专利代理师 严玉丹

(51) Int. Cl.

B60W 30/02 (2012.01)

B60L 15/20 (2006.01)

B60L 15/32 (2006.01)

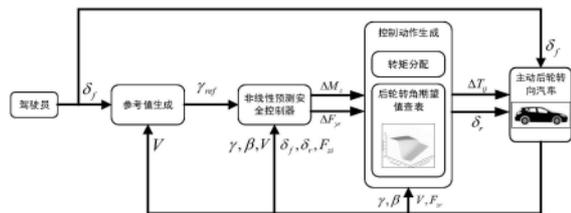
权利要求书4页 说明书15页 附图4页

(54) 发明名称

一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法

(57) 摘要

本发明涉及一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法,包括以下步骤:根据方向盘转角和当前的车辆行驶速度计算期望的横摆角速度,并根据当前的路面附着条件对横摆角速度的期望值进行限幅,生成最终的横摆角速度期望值;根据当前的车辆运动状态以及横摆角速度期望值构建优化问题,对优化问题进行求解并得到期望的主动后轮转角控制量与期望的附加横摆力矩控制量;根据期望的附加横摆力矩控制量计算出各个轮胎的附加转矩,根据期望的侧向力控制量得到期望的主动后轮转角,之后将各个轮胎的附加转矩和期望的主动后轮转角送入车辆的执行器进行协同控制。与现有技术相比,本发明方案避免了多个控制量的冲突,减低模型累积误差并大幅提升求解速度。



1. 一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:

根据方向盘转角和当前的车辆行驶速度计算期望横摆角速度;

根据当前的车辆运动状态以及期望横摆角速度构建原始优化问题,所述原始优化问题的目标函数用于跟踪横摆角速度、抑制质心侧偏角以及协同调整主动后轮转角和附加横摆力矩控制量;

求解原始优化问题得到期望主动后轮转角控制量与期望附加横摆力矩控制量;

根据期望附加横摆力矩控制量计算出各个轮胎的附加转矩;

根据期望侧向力控制量得到期望主动后轮转角;

将各个轮胎的附加转矩和期望主动后轮转角送入车辆的执行器进行协同控制;所述原始优化问题快速求解步骤如下:

基于庞特里亚金极值原理将待优化问题转化为一种显示的求解问题;

过粒子群优化的方式寻找最优协态变量初值;

在最优协态变量初值的基础上来间接求解原始优化问题。

2. 根据权利要求1所述的一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法,其特征在于,所述期望横摆角速度采用了二阶参考模型生成,前轮转角 $\delta_f$ 到期望横摆角速度 $\gamma_{ref}$ 的传递函数可表示为:

$$\frac{\gamma_{ref}}{\delta_f} = K_\gamma \frac{1 + \tau_\gamma s}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1}$$

其中, $\omega_n$ , $\zeta$ , $K_\gamma$ 以及 $\tau_\gamma$ 分别表示了自然震荡频率、阻尼系数、横摆角速度增益以及横摆角速度的微分系数,由如下方式计算:

$$\omega_n = \frac{2}{V} \sqrt{\frac{C_f C_r (L - KV^2)}{m I_z}}$$

$$\zeta = \frac{m(C_f L_f^2 + C_r L_r^2) + (C_f + C_r) I_z}{2\sqrt{L m I_z C_f C_r (L - KV^2)}}$$

$$K_\gamma = \frac{V}{L + KV^2}$$

$$\tau_\gamma = \frac{m V L_f}{2 C_r L}$$

其中, $K = -m(C_f L_f - C_r L_r) / 2C_f C_r L$ 被定义为不足转向梯度, $L = L_f + L_r$ 则定义为车辆的前后轴距, $L_f$ 和 $L_r$ 分别表示前后轴到车辆质心的距离, $V$ 表示车辆的纵向速度, $L$ , $m$ 是车辆的质量, $I_z$ 是车辆绕质心旋转的转动惯量, $C_f$ 、 $C_r$ 分别为前后轮胎侧偏刚度;

定义横摆角速度的上限值为 $\gamma_{up} = \left| \frac{\mu g}{V} \right|$ ,期望横摆角速度满足约束 $|\gamma_{ref}| \leq \gamma_{up}$ 。

3. 根据权利要求1所述的一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法,其特征在于,所述原始优化问题包括:

用于跟踪横摆角速度、抑制质心侧偏角以及协同调整主动后轮转角和附加横摆力矩控制量的目标函数；

根据车辆的安全性约束、作动器约束和实时行驶状态建立目标函数约束；

所述优化问题表达如下：

$$\min J = \sum_{k_i=k+1}^{k+N+1} [\Gamma_\gamma L_1(k_i) + \Gamma_\beta L_2(k_i) + \Gamma_{u1} L_3(k_i) + \Gamma_{u2} L_4(k_i)]$$

$$\text{s. t. } -1 \leq x_1(k_i) \leq 1$$

$$\Delta F_{yr, \min} \leq u_1(k_i) \leq \Delta F_{yr, \max}$$

$$-1 \leq u_2(k_i) \leq 1$$

式中,  $L_1(k_i)$ 、 $L_2(k_i)$  分别代表  $k_i$  时刻横摆角速度和质心侧偏角跟踪项的目标函数子项,  $L_3(k_i)$ 、 $L_4(k_i)$  代表  $k_i$  时刻主动后轮转角控制量  $u_1$  和附加横摆力矩控制量  $u_2$  的目标函数子项,  $\Gamma_\gamma$  和  $\Gamma_\beta$  分别表示横摆角速度跟踪项的权重系数和质心侧偏角跟踪项的权重系数,  $\Gamma_{u1}$  和  $\Gamma_{u2}$  分别表示附加横摆力矩控制量  $u_1$  和附加横摆力矩控制量  $u_2$  的权重系数,  $x_1(k_i)$  表示车辆的质心侧偏角跟踪项,  $u_1(k_i)$  和  $u_2(k_i)$  分别表示附加横摆力矩控制量和附加横摆力矩控制量,  $\Delta F_{yr, \min}$ 、 $\Delta F_{yr, \max}$  分别表示后轮轮胎的侧向力的附加部分的最小值和最大值。

4. 根据权利要求3所述的一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法, 其特征在于, 每个  $k+1 \leq k_i \leq k+N+1$  时刻,

所述跟踪质心侧偏角和跟踪横摆角速度的目标函数子项为:

$$L_1(k_i) = (x_2(k_i) - \gamma_{\text{ref}} / \gamma_{\text{up}})^2$$

$$L_2(k_i) = (x_1(k_i) - \beta_{\text{ref}} / \beta_{\text{up}})^2$$

其中,  $N$  表示预测时域的大小,  $x_1(k_i)$ 、 $x_2(k_i)$  分别表示车辆的质心侧偏角跟踪项与横摆角速度跟踪项; 横摆角速度上限值定义为  $\gamma_{\text{up}} = \left| \frac{\mu g}{V} \right|$ , 期望横摆角速度满足约束  $|\gamma_{\text{ref}}| \leq$

$\gamma_{\text{up}}$ , 期望质心侧偏角定义为  $\beta_{\text{ref}} = 0$ , 定义质心侧偏角上限值为:  $\beta_{\text{up}} = \left| \mu g \left( \frac{L_r}{V^2} + \frac{m L_f}{C_r L} \right) \right|$ , 质心侧偏角满足的约束为  $|\beta| \leq \beta_{\text{up}}$ ;

所述附加横摆力矩控制量  $u_1$  和附加横摆力矩控制量  $u_2$  的目标函数子项为:

$$L_3(k_i) = u_1(k_i - 1)^2$$

$$L_4(k_i) = u_2(k_i - 1)^2。$$

5. 根据权利要求4所述的一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法, 其特征在于, 所述车辆的质心侧偏角跟踪项  $x_1(k_i)$  与横摆角速度跟踪项  $x_2(k_i)$  基于离散的车辆二自由度自行车模型得到, 步骤如下:

定义系统的状态向量为  $x = [x_1, x_2]^T = [\beta / \beta_{\text{up}}, \gamma / \gamma_{\text{up}}]^T$ , 其中,  $\beta$  和  $\gamma$  分别表示车辆的质心侧偏角和车辆的横摆角速度,  $\gamma_{\text{up}}$ 、 $\beta_{\text{up}}$  分别表示横摆角速度上限值与质心侧偏角上限值;

定义系统的控制输入为归一化的形式  $u = [u_1, u_2]^T = [\Delta F_{yr}, \Delta M_z / \Delta M_{\text{max}}]^T$ , 其中,  $\Delta F_{yr}$  表示后轮轮胎的侧向力附加部分,  $\Delta M_z$  为附加横摆力矩,  $\Delta M_{\text{max}}$  表示附加横摆力矩的最大值;

由离散化车辆二自由度自行车模型得到:

$$x_1(k+1) = T_s \frac{F_{yf}(k) + \tilde{F}_{yr}(k) + u_1(k)}{mV\beta_{up}} + x_1(k) - T_s \frac{\gamma_{up}}{\beta_{up}} x_2(k)$$

$$x_2(k+1) = T_s \frac{L_f F_{yf}(k) - L_r [\tilde{F}_{yr}(k) + u_1(k)]}{\gamma_{up} I_z} + x_2(k) + \frac{\Delta M_{\max} T_s}{\gamma_{up} I_z} u_2(k)$$

其中,  $T_s$  表示系统的离散时间,  $u_1(k)$  表示附加横摆力矩控制量,  $L_f$  和  $L_r$  分别表示前后轴到车辆质心的距离,  $m$  是车辆的质量,  $I_z$  是车辆绕质心旋转的转动惯量,  $V$  表示车辆的纵向速度; 前轮的侧向力  $F_{yf}$  和后轮侧向力的标准部分  $\tilde{F}_{yr}$  由的非线性轮胎模型进行计算得到。

6. 根据权利要求5所述的一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法, 其特征在于, 所述非线性轮胎模型采用非线性的Fiala轮胎模型, 令  $\tan(\alpha) \approx \alpha$ , 非线性轮胎模型表示为如下形式:

$$F_y = \begin{cases} -C_\alpha \alpha + \frac{C_\alpha^2}{3\mu F_z} |\alpha| \alpha - \frac{1}{3} \frac{C_\alpha^3}{(3\mu F_z)^2} \alpha^3, & |\alpha| \leq \arctan\left(\frac{3\mu F_z}{C_\alpha}\right) \\ -\mu F_z \operatorname{sgn} \alpha, & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中,  $\mu$  为路面附着系数,  $F_z$  为垂直载荷,  $C_\alpha$  为轮胎侧偏刚度,  $\alpha$  为轮胎侧偏角分为前轮侧偏角  $\alpha_f$  和后轮侧偏角  $\alpha_r$ , 分别由下式进行计算:

$$\alpha_f = \beta + \frac{L_f}{V} \gamma - \delta_f$$

$$\alpha_r = \beta - \frac{L_r}{V} \gamma - \delta_r$$

其中,  $\beta$  和  $\gamma$  分别表示车辆的质心侧偏角和横摆角速度,  $L_f$  和  $L_r$  分别表示前后轴到车辆质心的距离,  $V$  表示车辆的纵向速度,  $\delta_f$  和  $\delta_r$  分别表示车辆的前轮转角和后轮转角。

7. 根据权利要求1所述的一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法, 其特征在于, 所述优化问题进行求解的具体步骤包括:

引入松弛因子, 对状态约束转化进行转化;

根据目标函数和车辆系统状态空间方程构建相应的哈密顿函数;

根据二元函数极小值原理推导出显式最优控制量表达式, 再根据极值原理推导出哈密顿方程的迭代关系以及终端条件;

寻找最优协态变量初值, 在最优初值的基础上通过显式的迭代方式获得最优控制输入序列。

8. 根据权利要求1所述的一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法, 其特征在于, 所述最优协态变量初值通过粒子群优化的方式寻找得到, 步骤包括:

种群初始化: 给定初始点的位置; 在初始点附近生成多个初始种群粒子并设置初始点的速度; 根据显式最优控制量的解析解, 通过哈密顿方程的迭代关系, 对初始种群中的粒子进行收敛值计算, 计算完成后找出全体种群粒子中的最优点和最差点, 并分别记录对应的收敛值; 设定每个粒子的历史最优点为当前的初始位置点, 同时定义当前迭代次数为0;

粒子种群更新: 根据每个粒子的历史最优点对全体粒子种群的历史最优点进行速度和位置更新;

粒子种群收敛值更新: 将更新后的粒子群重新进行收敛值计算, 在计算过程中, 若第  $i$

个粒子的收敛值小于第*i*个粒子当前的最优值,则更新粒子的历史最优点的位置为当前的粒子位置,否则仍保持粒子的历史最优点位置不变;在所有粒子收敛值计算完成后,更新群体最优点为当前所有粒子收敛值中最小的粒子的位置,更新群体最差点为当前所有粒子收敛值中最大的粒子的位置,令当前迭代次数增加一次;

终止条件判断:设定终止条件包括:

$$\lambda(P_{w,g}) > \lambda(P_{b,g}) + \varepsilon \text{ and } I_c < I_{\max}$$

$$I_c < I_{\min}$$

其中 $\lambda(P_{b,g})$ 和 $\lambda(P_{w,g})$ 分别表示在在群体最优点和群体最差点作为拉格朗日乘子初始值时,进行收敛值计算得到最终收敛值, $\varepsilon$ 表示容差, $I_c$ 表示迭代次数, $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ 分别表示设置的最大迭代次数与最小迭代次数;

粒子种群更新结束后,对上述终止条件进行判断,若满足其中一个条件,则表示搜索过程未完成,则返回粒子种群更新继续迭代;若上述两个条件均不满足,则搜索结束,输出当前的群体最优点作为最优的拉格朗日乘子初始值。

9. 根据权利要求1所述的一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法,其特征在于,所述附加横摆力矩采用平均分配的方式来产生,根据求解优化问题得到的最优附加横摆力矩控制量输入 $u_2^*(k)$ ,得到分配至各个轮胎的附加转矩为:

$$\Delta T_{cfl}(k) = \Delta T_{crl}(k) = -\frac{u_2^*(k)\Delta M_{\max}}{d} R_e$$

$$\Delta T_{cfr}(k) = \Delta T_{crr}(k) = \frac{u_2^*(k)\Delta M_{\max}}{d} R_e$$

其中, $\Delta T_{cfl}$ 、 $\Delta T_{crl}$ 分别表示左侧前轮和后轮的附加转矩, $\Delta T_{cfr}$ 、 $\Delta T_{crr}$ 则分别表示右侧前轮和后轮的附加转矩, $\Delta M_{\max}$ 表示附加横摆力矩的最大值, $R_e$ 表示轮胎有效的滚动半径, $d$ 表示车身宽度。

10. 根据权利要求1所述的一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法,其特征在于,所述根据期望的侧向力控制量得到期望的主动后轮转角的步骤包括:

根据轮胎型号构建轮胎侧向力MAP表,所述MAP表的三轴分别为轮胎侧向力、轮胎侧偏角以及垂直载荷;

由轮胎的垂直载荷以及期望的轮胎侧向力,通过查表法得到相应的轮胎侧偏角;

求出期望的主动后轮转角:

$$\delta_{r,ref} = \beta - \frac{L_r}{V} \gamma - \alpha_{r,ref}$$

其中, $\beta$ 表示车辆的质心侧偏角, $L_r$ 表示后轴到车辆质心的距离, $V$ 表示车辆的纵向速度, $\gamma$ 表示车辆的横摆角速度, $\alpha_{r,ref}$ 为由查表得到的期望的后轮侧偏角。

## 一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电动汽车控制技术领域,尤其是涉及一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法。

### 背景技术

[0002] 四轮独立驱动与转向汽车是一种通过在车辆安装分布式驱动电机以及前后轴独立转向电机,使四个轮胎的力矩以及前后轴的转向角可以独立调节的特殊车辆。通过主动转向,可以直接控制车辆的轮胎侧偏角,进而控制车辆的轮胎侧向力。可以看出,主动转向的引入为车辆的控制增加了一种控制量,能够大大提高车辆控制的灵活性和安全性。同时分布式驱动电机的引入,也使得四轮扭矩可以直接调节。因此在极限工况下,相较于传统车辆,四轮独立驱动与转向汽车能够大大提升安全性,具有较为广阔的应用前景。但由于车辆本身是一个复杂的非线性系统,尤其是在极限工况下,轮胎力趋于饱和,车辆的非线性特性更加显著。而在另一方面,由于控制量的增加,车辆模型的复杂程度进一步增加,各个控制量与状态量之间的耦合关系更加复杂。因此,在设计控制器时要充分考虑到车辆的复杂非线性以及耦合特性,以及多个控制量同时作用下的协同问题。在极限工况下,由于车辆行驶的稳定区域较小,需要对车辆未来一段时间内的状态进行合理预测,发现潜在的安全性风险以防止车辆失去稳定性。因此在整个过程中,需要考虑到车辆系统的强非线性和强耦合特性以及车辆自身的安全性约束和控制约束。为了解决上述问题,预测协同控制是一种较为理想的方法。通过该方法,原始的控制问题被转化为约束下的非线性优化问题,并通过非线性规划的方法来进行求解。但在现有的技术条件下,车载控制器的计算能力较为有限,可能无法及时求解出优化问题的解。而车辆又是一个典型的快变系统,若无法在短时间内求解出相应的控制量,则有可能造成车辆失去稳定性。综上所述。当前的极限工况下面向四轮独立驱动与转向汽车的预测协同控制主要存在着以下问题:

[0003] 1. 相比于一般工况,极限工况下的车辆非线性特性更加突出,为了改善控制性能,一般采用非线性模型对控制量的作用进行建模。但在极限工况下,非线性模型仍会引入建模误差,从而影响控制性能的进一步提升。

[0004] 2. 传统的方法中没有将四轮独立驱动与转向汽车的多个控制量的耦合作用考虑在内。在极限工况下,若不考虑多个控制量之间的协同与冲突问题,则可能影响控制效果,严重时还可能造成车辆失去稳定性。

[0005] 3. 由于采用了非线性车辆模型来提高模型精度,因此需要求解的优化问题也是一个非线性优化问题。若采用常规的直接优化方法(如序列二次规划SQP和内点法IPOPT),所需要的求解时间将大大超过车辆的控制周期,从而导致无法及时求解出最优控制量,不能在车载控制器上进行应用。

[0006] 中国专利CN202011114070.1公开了一种快速实时的后轮主动转向预测控制方法,该方案为了便于求解,车辆的后轮轮胎模型使用了一种线性的轮胎模型,实际上车辆的轮胎力是纵向和侧向相互耦合的,并且该方案的控制器直接对后轮转角进行优化。但由于采

用了线性轮胎模型,模型误差较大,因此这种方法的控制效果较差。并且该方案采用了一种基于单纯形的寻优算法对优化问题进行求解。但该方法在使用过程中易陷入局部最优解,对全局最优解的探索性较差。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的就是为了解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种针对在极限工况下的四轮独立驱动与转向汽车预测协同控制方法。

[0008] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:

[0009] 一种四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法,所述方法包括以下步骤:

[0010] 根据方向盘转角和当前的车辆行驶速度计算期望横摆角速度;

[0011] 根据当前的车辆运动状态以及期望横摆角速度构建原始优化问题,所述原始优化问题的目标函数用于跟踪横摆角速度、抑制质心侧偏角以及协同调整主动后轮转角和附加横摆力矩控制量;

[0012] 求解原始优化问题得到期望主动后轮转角控制量与期望附加横摆力矩控制量;

[0013] 根据期望附加横摆力矩控制量计算出各个轮胎的附加转矩;

[0014] 根据期望侧向力控制量得到期望主动后轮转角;

[0015] 将各个轮胎的附加转矩和期望主动后轮转角送入车辆的执行器进行协同控制;所述原始优化问题快速求解步骤如下:

[0016] 基于庞特里亚金极值原理将待优化问题转化为一种显示的求解问题;

[0017] 过粒子群优化的方式寻找最优协态变量初值;

[0018] 在最优协态变量初值的基础上来间接求解原始优化问题。

[0019] 进一步的,所述期望横摆角速度采用了二阶参考模型生成,前轮转角 $\delta_f$ 到期望横摆角速度 $\gamma_{ref}$ 的传递函数可表示为:

$$[0020] \quad \frac{\gamma_{ref}}{\delta_f} = K_\gamma \frac{1 + \tau_\gamma s}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1}$$

[0021] 其中, $\omega_n$ , $\zeta$ , $K_\gamma$ 以及 $\tau_\gamma$ 分别表示了自然震荡频率、阻尼系数、横摆角速度增益以及横摆角速度的微分系数,由如下方式计算:

$$[0022] \quad \omega_n = \frac{2}{V} \sqrt{\frac{C_f C_r (L - KV^2)}{m I_z}}$$

$$[0023] \quad \zeta = \frac{m(C_f L_f^2 + C_r L_r^2) + (C_f + C_r) I_z}{2\sqrt{L m I_z C_f C_r (L - KV^2)}}$$

$$[0024] \quad K_\gamma = \frac{V}{L + KV^2}$$

$$[0025] \quad \tau_\gamma = \frac{m V L_f}{2 C_r L}$$

[0026] 其中, $K = -m(C_f L_f - C_r L_r) / 2 C_f C_r L$ 被定义为不足转向梯度, $L = L_f + L_r$ 则定义为车辆的

前后轴距,  $L_f$ 和 $L_r$ 分别表示前后轴到车辆质心的距离,  $V$ 表示车辆的纵向速度,  $L, m$ 是车辆的质量,  $I_z$ 是车辆绕质心旋转的转动惯量,  $C_f, C_r$ 分别为前后轮胎侧偏刚度;

[0027] 定义横摆角速度的上限值为 $\gamma_{up} = \left| \frac{\mu g}{V} \right|$ , 期望横摆角速度满足约束 $|\gamma_{ref}| \leq \gamma_{up}$ 。

[0028] 进一步的, 所述原始优化问题包括:

[0029] 用于跟踪横摆角速度、抑制质心侧偏角以及协同调整主动后轮转角和附加横摆力矩控制量的目标函数;

[0030] 根据车辆的安全性约束、作动器约束和实时行驶状态建立目标函数约束;

[0031] 所述优化问题表达如下:

$$[0032] \quad \min J = \sum_{k_i=k+1}^{k+N+1} \left[ \Gamma_\gamma L_1(k_i) + \Gamma_\beta L_2(k_i) + \Gamma_{u_1} L_3(k_i) + \Gamma_{u_2} L_4(k_i) \right]$$

$$[0033] \quad \text{s. t. } -1 \leq x_1(k_i) \leq 1$$

$$[0034] \quad \Delta F_{yr, \min} \leq u_1(k_i) \leq \Delta F_{yr, \max}$$

$$[0035] \quad -1 \leq u_2(k_i) \leq 1$$

[0036] 式中,  $L_1(k_i)$ 、 $L_2(k_i)$  分别代表 $k_i$ 时刻横摆角速度和质心侧偏角跟踪项的目标函数子项,  $L_3(k_i)$ 、 $L_4(k_i)$  代表 $k_i$ 时刻主动后轮转角控制量 $u_1$ 和附加横摆力矩控制量 $u_2$ 的目标函数子项,  $\Gamma_\gamma$ 和 $\Gamma_\beta$ 分别表示横摆角速度跟踪项的权重系数和质心侧偏角跟踪项的权重系数,  $\Gamma_{u_1}$ 和 $\Gamma_{u_2}$ 分别表示附加横摆力矩控制量 $u_1$ 和附加横摆力矩控制量 $u_2$ 的权重系数,  $x_1(k_i)$ 表示车辆的质心侧偏角跟踪项,  $u_1(k_i)$ 和 $u_2(k_i)$ 分别表示附加横摆力矩控制量和附加横摆力矩控制量,  $\Delta F_{yr, \min}$ 、 $\Delta F_{yr, \max}$ 分别表示后轮轮胎的侧向力的附加部分的最小值和最大值。

[0037] 进一步的, 每个 $k+1 \leq k_i \leq k+N+1$ 时刻,

[0038] 所述跟踪质心侧偏角和跟踪横摆角速度的目标函数子项为:

$$[0039] \quad L_1(k_i) = (x_2(k_i) - \gamma_{ref} / \gamma_{up})^2$$

$$[0040] \quad L_2(k_i) = (x_1(k_i) - \beta_{ref} / \beta_{up})^2$$

[0041] 其中,  $N$ 表示预测时域的大小,  $x_1(k_i)$ 、 $x_2(k_i)$  分别表示车辆的质心侧偏角跟踪项与

横摆角速度跟踪项; 横摆角速度上限值定义为 $\gamma_{up} = \left| \frac{\mu g}{V} \right|$ , 期望横摆角速度满足约束 $|\gamma_{ref}|$

$\leq \gamma_{up}$ , 期望质心侧偏角定义为 $\beta_{ref} = 0$ , 定义质心侧偏角上限值为:  $\beta_{up} = \left| \mu g \left( \frac{L_r}{V^2} + \frac{m L_f}{C_r L} \right) \right|$ ,

质心侧偏角满足的约束为 $|\beta| \leq \beta_{up}$ ;

[0042] 所述附加横摆力矩控制量 $u_1$ 和附加横摆力矩控制量 $u_2$ 的目标函数子项为:

$$[0043] \quad L_3(k_i) = u_1(k_i - 1)^2$$

$$[0044] \quad L_4(k_i) = u_2(k_i - 1)^2。$$

[0045] 进一步的, 所述车辆的质心侧偏角跟踪项 $x_1(k_i)$ 与横摆角速度跟踪项 $x_2(k_i)$ 基于离散的车辆二自由度自行车模型得到, 步骤如下:

[0046] 定义系统的状态向量为 $x = [x_1, x_2]^T = [\beta / \beta_{up}, \gamma / \gamma_{up}]^T$ , 其中,  $\beta$ 和 $\gamma$ 分别表示车辆的质心侧偏角和车辆的横摆角速度,  $\gamma_{up}$ 、 $\beta_{up}$ 分别表示横摆角速度上限值与质心侧偏角上限值;

[0047] 定义系统的控制输入为归一化的形式  $u = [u_1, u_2]^T = [\Delta F_{yr}, \Delta M_z / \Delta M_{\max}]^T$ , 其中,  $\Delta F_{yr}$  表示后轮轮胎的侧向力附加部分,  $\Delta M_z$  为附加横摆力矩,  $\Delta M_{\max}$  表示附加横摆力矩的最大值;

[0048] 由离散化车辆二自由度自行车模型得到:

$$[0049] \quad x_1(k+1) = T_s \frac{F_{yf}(k) + \tilde{F}_{yr}(k) + u_1(k)}{mV\beta_{up}} + x_1(k) - T_s \frac{\gamma_{up}}{\beta_{up}} x_2(k)$$

$$[0050] \quad x_2(k+1) = T_s \frac{L_f F_{yf}(k) - L_r [\tilde{F}_{yr}(k) + u_1(k)]}{\gamma_{up} I_z} + x_2(k) + \frac{\Delta M_{\max} T_s}{\gamma_{up} I_z} u_2(k)$$

[0051] 其中,  $T_s$  表示系统的离散时间,  $u_1(k)$  表示附加横摆力矩控制量,  $L_f$  和  $L_r$  分别表示前后轴到车辆质心的距离,  $m$  是车辆的质量,  $I_z$  是车辆绕质心旋转的转动惯量,  $V$  表示车辆的纵向速度; 前轮的侧向力  $F_{yf}$  和后轮侧向力的标准部分  $\tilde{F}_{yr}$  由的非线性轮胎模型进行计算得到。

[0052] 进一步的, 所述非线性轮胎模型采用非线性的Fiala轮胎模型, 令  $\tan(\alpha) \approx \alpha$ , 非线性轮胎模型表示为如下形式:

$$[0053] \quad F_y = \begin{cases} -C_\alpha \alpha + \frac{C_\alpha^2}{3\mu F_z} |\alpha| \alpha - \frac{1}{3} \frac{C_\alpha^3}{(3\mu F_z)^2} \alpha^3, & |\alpha| \leq \arctan\left(\frac{3\mu F_z}{C_\alpha}\right) \\ -\mu F_z \operatorname{sgn} \alpha, & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0054] 其中,  $\mu$  为路面附着系数,  $F_z$  为垂直载荷,  $C_\alpha$  为轮胎侧偏刚度,  $\alpha$  为轮胎侧偏角分为前轮侧偏角  $\alpha_f$  和后轮侧偏角  $\alpha_r$ , 分别由下式进行计算:

$$[0055] \quad \alpha_f = \beta + \frac{L_f}{V} \gamma - \delta_f$$

$$[0056] \quad \alpha_r = \beta - \frac{L_r}{V} \gamma - \delta_r$$

[0057] 其中,  $\beta$  和  $\gamma$  分别表示车辆的质心侧偏角和横摆角速度,  $L_f$  和  $L_r$  分别表示前后轴到车辆质心的距离,  $V$  表示车辆的纵向速度,  $\delta_f$  和  $\delta_r$  分别表示车辆的前轮转角和后轮转角。

[0058] 进一步的, 所述优化问题进行求解的具体步骤包括:

[0059] 引入松弛因子, 对状态约束转化进行转化;

[0060] 根据目标函数和车辆系统状态空间方程构建相应的哈密顿函数;

[0061] 根据二元函数极小值原理推导出显式最优控制量表达式, 再根据极值原理推导出哈密顿方程的迭代关系以及终端条件;

[0062] 寻找最优协态变量初值, 在最优初值的基础上通过显式的迭代方式获得最优控制输入序列。

[0063] 进一步的, 所述最优协态变量初值通过粒子群优化的方式寻找得到, 步骤包括:

[0064] 种群初始化: 给定初始点的位置; 在初始点附近生成多个初始种群粒子并设置初始点的速度; 根据显式最优控制量的解析解, 通过哈密顿方程的迭代关系, 对初始种群中的粒子进行收敛值计算, 计算完成后找出全体种群粒子中的最优点和最差点, 并分别记录对应的收敛值; 设定每个粒子的历史最优点为当前的初始位置点, 同时定义当前迭代次数为 0;

[0065] 粒子种群更新:根据每个粒子的历史最优点对全体粒子种群的历史最优点进行速度和位置更新;

[0066] 粒子种群收敛值更新:将更新后的粒子群重新进行收敛值计算,在计算过程中,若第*i*个粒子的收敛值小于第*i*个粒子当前的最优值,则更新粒子的历史最优点的位置为当前的粒子位置,否则仍保持粒子的历史最优点位置不变;在所有粒子收敛值计算完成后,更新群体最优点为当前所有粒子收敛值中最小的粒子的位置,更新群体最差点为当前所有粒子收敛值中最大的粒子的位置,令当前迭代次数增加一次;

[0067] 终止条件判断:设定终止条件包括:

$$[0068] \quad \lambda(P_{w,g}) > \lambda(P_{b,g}) + \varepsilon \text{ and } I_c < I_{\max}$$

$$[0069] \quad I_c < I_{\min}$$

[0070] 其中 $\lambda(P_{b,g})$ 和 $\lambda(P_{w,g})$ 分别表示在在群体最优点和群体最差点作为拉格朗日乘子初始值时,进行收敛值计算得到最终收敛值, $\varepsilon$ 表示容差, $I_c$ 表示迭代次数, $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ 分别表示设置的最大迭代次数与最小迭代次数;

[0071] 粒子种群更新结束后,对上述终止条件进行判断,若满足其中一个条件,则表示搜索过程未完成,则返回粒子种群更新继续迭代;若上述两个条件均不满足,则搜索结束,输出当前的群体最优点作为最优的拉格朗日乘子初始值。

[0072] 进一步的,所述附加横摆力矩采用平均分配的方式来产生,根据求解优化问题得到的最优附加横摆力矩控制量输入 $u_2^*(k)$ ,得到分配至各个轮胎的附加转矩为:

$$[0073] \quad \Delta T_{cfl}(k) = \Delta T_{crl}(k) = -\frac{u_2^*(k)\Delta M_{\max}}{d} R_e$$

$$[0074] \quad \Delta T_{cfr}(k) = \Delta T_{crr}(k) = \frac{u_2^*(k)\Delta M_{\max}}{d} R_e$$

[0075] 其中, $\Delta T_{cfl}$ 、 $\Delta T_{crl}$ 分别表示左侧前轮和后轮的附加转矩, $\Delta T_{cfr}$ 、 $\Delta T_{crr}$ 则分别表示右侧前轮和后轮的附加转矩, $\Delta M_{\max}$ 表示附加横摆力矩的最大值, $R_e$ 表示轮胎有效的滚动半径, $d$ 表示车身宽度。

[0076] 进一步的,所述根据期望的侧向力控制量得到期望的主动后轮转角的步骤包括:

[0077] 根据轮胎型号构建轮胎侧向力MAP表,所述MAP表的三轴分别为轮胎侧向力、轮胎侧偏角以及垂直载荷;

[0078] 由轮胎的垂直载荷以及期望的轮胎侧向力,通过查表法得到相应的轮胎侧偏角;

[0079] 求出期望的主动后轮转角:

$$[0080] \quad \delta_{r,ref} = \beta - \frac{L_r}{V} \gamma - \alpha_{r,ref}$$

[0081] 其中, $\beta$ 表示车辆的质心侧偏角, $L_r$ 表示后轴到车辆质心的距离, $V$ 表示车辆的纵向速度, $\gamma$ 表示车辆的横摆角速度, $\alpha_{r,ref}$ 为由查表得到的期望的后轮侧偏角。

[0082] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果:

[0083] 1) 本发明基于极值原理将原始优化问题进行转化,将传统的直接求解最优优化变量的方式转化为通过协态变量间接求解最优控制量的方式,同时基于粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization,PSO)原理设计了最优协态变量初值的搜索方法。与传统的直接求解方法相比,全局最优解的寻优能力强,进一步提高了控制性能,并能够大幅度提

升求解速度。

[0084] 2) 在极限工况下,车辆的非线性特性显著,为了改善控制性能,尽可能避免控制量的建模误差对控制效果带来的不利影响,本发明中直接对轮胎侧向力进行优化,并建立了轮胎侧向力的高精度MAP表用于查找期望轮胎侧向力所对应的主动后轮转角。通过该方法能够有效减低预测过程中的模型累积误差,提升控制效果。

[0085] 3) 相比于传统车辆,四轮独立驱动与转向汽车的多个控制量与状态之间的耦合关系更为复杂。为了协同多个控制量并避免控制量之间的冲突,本发明在目标函数中对跟踪横摆角速度、抑制质心侧偏角以及协同调整主动后轮转角和附加横摆力矩控制量同时进行优化,并根据车辆的行驶状态实时调整约束,有效避免了多个控制量的冲突问题,能够更有效地协同调整多个控制量。

### 附图说明

[0086] 图1是发明中所设计的协同控制方法的流程框图;

[0087] 图2是车辆模型示意图;

[0088] 图3是高精度轮胎侧向力MAP图;

[0089] 图4是松弛函数值随状态变化示意图;

[0090] 图5是迭代关系示意图;

[0091] 图6是基于内点法的直接求解方法在不同预测时域下的计算时间对比图;

[0092] 图7是本发明提出的快速求解算法在不同预测时域下的计算时间对比图;

[0093] 图8是本发明一实施例中两种算法在不同预测时域下的平均求解时间对比图;

[0094] 图9是本发明一实施例中两种算法以及关闭控制器时的车辆状态仿真结果示意图,(a)为IPOPT算法的车辆状态仿真结果示意图,(b)为PMP算法的车辆状态仿真结果示意图,(c)为两种算法以及关闭控制器时的控制效果对比图。

### 具体实施方式

[0095] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。本实施例以本发明技术方案为前提进行实施,给出了详细的实施方式和具体的操作过程,但本发明的保护范围不限于下述的实施例。

[0096] 本发明中所设计的协同控制方法架构如图1所示,驾驶员会根据当前的车辆状态给出一定的方向盘转角。在参考值生成模块中,根据驾驶员打出的方向盘转角和当前的车辆行驶速度计算期望的横摆角速度,同时还要根据当前的路面附着条件对期望值进行限幅以满足最大摩擦力条件,之后将最终的横摆角速度期望值送入预测控制器。在预测控制器中,根据当前的车辆运动状态以及参考值生成模块计算出的横摆角速度期望值构建原始优化问题,之后对该优化问题进行求解并得到两个期望的控制量,并将期望控制量送入控制作用生成模块。在控制作用生成模块中,首先根据期望的附加横摆力矩计算出各个轮胎的附加转矩,再根据期望的侧向力进行查表得到期望的主动后轮转角,之后将各个轮胎的附加转矩和主动后轮转角送入车辆的执行器。

[0097] 本实施例提供四轮独立驱动与转向电动汽车的协同控制方法的实现步骤并对协同控制方法进行仿真试验,包括以下部分:

[0098] 一、预测控制：

[0099] 1) 建立考虑多控制量的车辆动力学模型；

[0100] 2) 根据CarSim中的轮胎型号建立轮胎力map表,用于查找期望后轮主动转角；

[0101] 3) 根据线性二自由度模型建立期望横摆角速度的参考模型；

[0102] 4) 建立目标函数用于跟踪横摆角速度、抑制质心侧偏角以及协同调整主动后轮转角和附加横摆力矩两个控制量；

[0103] 5) 根据车辆的安全性约束、作动器约束和实时行驶状态建立目标函数约束。

[0104] 二、非线性优化问题的快速实时求解方法设计

[0105] 1) 引入松弛因子,原始状态约束下的优化问题转化为无约束优化问题；

[0106] 2) 根据目标函数和系统状态空间方程构建相应的哈密顿函数；

[0107] 3) 根据二元函数极小值原理推导出显式最优控制量表达式,再根据极值原理推导出哈密顿方程的迭代关系以及终端条件；

[0108] 4) 根据PSO优化算法原理设计协态变量的最优初值搜索算法。

[0109] 三、极限工况下四轮独立驱动与转向电动汽车的建模与仿真工况构建:在CarSim软件中选择相应的车辆模型,之后再将该车辆的后轴系统替换为主动转向的后轴系统。最后在此模型的基础上配置仿真工况,用于模拟车辆在极限工况下的运动状态;对所设计算法的有效性和快速性进行验证。

[0110] 具体实现与仿真步骤如下：

[0111] 本发明的被控对象是行驶在低附着路面上的后轮主动转向车辆,因此控制目标就是根据当前车辆的状态信息以及当前的参考值计算出所需要的后轮转角以及附加横摆力矩,提高车辆的稳定性。主要设计过程描述如下。首先,针对后轮主动转向车辆的横摆运动和侧向运动进行建模,建立合适的数学模型。

[0112] 1) 车辆二自由度自行车模型

[0113] 在本发明中主要考虑的是车辆的侧向运动与横摆运动,而车辆的纵向运动则不在考虑范围内,因此采用了已被广泛应用的车辆二自由度自行车模型来对侧向运动和横摆运动进行描述。在该模型中,首先假设车辆的纵向速度在一个短时间区域内保持不变,之后该模型可表示为如下形式：

$$\begin{aligned}
 \dot{\beta} &= \frac{F_{yf} + F_{yr}}{mV} - \gamma \\
 \dot{\gamma} &= \frac{L_f F_{yf} - L_r F_{yr} + \Delta M_z}{I_z}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

[0115] 其中,  $\dot{\beta}$  和  $\dot{\gamma}$  分别表示车辆的质心侧偏角的导数和车辆的横摆角速度的导数,  $V$  表示车辆的纵向速度,  $F_{yf}$  和  $F_{yr}$  则分别表示前后轮胎的轮胎侧向力,  $L_f$  和  $L_r$  分别表示前后轴到车辆质心的距离,  $m$  是车辆的质量,  $I_z$  是车辆绕质心旋转的转动惯量,  $\Delta M_z$  为附加的横摆力矩。在本发明中,后轮轮胎的侧向力被划分为了两个部分,即  $F_{yr} = \tilde{F}_{yr} + \Delta F_{yr}$ 。其中的  $\tilde{F}_{yr}$  定义为标准侧向力,该部分是由轮胎的侧偏角导致的。而另一部分  $\Delta F_{yr}$  则定义为附加部分,该部分是由主动后轮转角  $\delta_r$  而引起的侧向力。该系统的控制输入定义为由轮胎纵向力产生的附加横摆力矩  $\Delta M_z$  和由主动后轮产生的附加后轮侧向力  $\Delta F_{yr}$ 。

[0116] 2) 非线性轮胎模型

[0117] 在极限工况下,由于车辆的非线性特性更加突出,必须在模型中考虑车辆的非线性特性。在本实施例中,采用了非线性的Fiala轮胎模型来对极限工况下的车辆轮胎特性进行描述。由于车辆轮胎的侧偏角 $\alpha$ 幅值较小,因此假设 $\tan(\alpha) \approx \alpha$ ,在该假设下,原轮胎模型便可表示为如下形式:

$$[0118] \quad F_y = \begin{cases} -C_\alpha \alpha + \frac{C_\alpha^2}{3\mu F_z} |\alpha| \alpha - \frac{1}{3} \frac{C_\alpha^3}{(3\mu F_z)^2} \alpha^3, & |\alpha| \leq \arctan\left(\frac{3\mu F_z}{C_\alpha}\right) \\ -\mu F_z \operatorname{sgn} \alpha, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

[0119] 其中 $\mu$ 为路面附着系数, $F_z$ 为垂直载荷, $C_\alpha$ 为轮胎侧偏刚度。式中的轮胎侧偏角 $\alpha$ 分为前轮侧偏角 $\alpha_f$ 和后轮侧偏角 $\alpha_r$ ,它们可分别由下式进行计算:

$$[0120] \quad \begin{aligned} \alpha_f &= \beta + \frac{L_f}{V} \gamma - \delta_f \\ \alpha_r &= \beta - \frac{L_r}{V} \gamma - \delta_r \end{aligned} \quad (3)$$

[0121] 其中 $\delta_f$ 和 $\delta_r$ 分别表示车辆的前轮转角和后轮转角, $\beta$ 和 $\gamma$ 分别表示车辆的质心侧偏角和横摆角速度。

[0122] 3) 车辆参考模型建立

[0123] 在极限工况下,考虑到系统的非线性特性,采用了一个二阶参考模型来生成期望的横摆角速度。前轮转角 $\delta_f$ 到期望横摆角速度 $\gamma_{ref}$ 的传递函数可表示为

$$[0124] \quad \frac{\gamma_{ref}}{\delta_f} = K_\gamma \frac{1 + \tau_\gamma s}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1} \quad (4)$$

[0125] 其中 $\omega_n$ , $\zeta$ , $K_\gamma$ 以及 $\tau_\gamma$ 分别表示了自然震荡频率、阻尼系数、横摆角速度增益以及横摆角速度的微分系数。它们可由如下方式计算:

$$[0126] \quad \begin{aligned} \omega_n &= \frac{2}{V} \sqrt{\frac{C_f C_r (L - KV^2)}{m I_z}} \\ \zeta &= \frac{m(C_f L_f^2 + C_r L_r^2) + (C_f + C_r) I_z}{2\sqrt{L m I_z C_f C_r (L - KV^2)}} \\ K_\gamma &= \frac{V}{L + KV^2} \\ \tau_\gamma &= \frac{m V L_f}{2 C_r L} \end{aligned} \quad (5)$$

[0127] 上式中的 $K = -m(C_f L_f - C_r L_r) / 2C_f C_r L$ 被定义为不足转向梯度, $L = L_f + L_r$ 则定义为车辆的前后轴距。

[0128] 在上述参考模型的基础上,车辆的期望横摆角速度能够根据驾驶员输入的前轮转角得到。但由于在极限工况下,车辆轮胎的附着力有限,有若出现过大的横摆角速度则会导致车辆不稳定。基于上述考虑,由参考模型生成的期望横摆角速度应该根据行驶路面的附

着条件进行限幅处理。在此我们定义横摆角速度的上限值为 $\gamma_{up} = \left| \frac{\mu g}{V} \right|$ ，之后横摆角速度的实际值应满足的约束为 $|\gamma_{ref}| \leq \gamma_{up}$ 。由于在本发明中控制方法设计的主要目的是为了跟踪车辆的期望横摆角速度值，同时还要尽可能地抑制车辆的质心侧偏角 $\beta$ ，因此质心侧偏角的期望值被定义为 $\beta_{ref} = 0$ 。此外，由于在极限工况下一个过大的质心侧偏角会极大地恶化车辆稳定性与操纵性。出于安全的考虑，质心侧偏角也应该被限制在一个安全区域内。我们定义质心侧偏角的上限值为：

$$[0129] \quad \beta_{up} = \left| \mu g \left( \frac{L_r}{V^2} + \frac{mL_f}{C_r L} \right) \right| \quad (6)$$

[0130] 类似于车辆的横摆角速度，其质心侧偏角应满足的约束为 $|\beta| \leq \beta_{up}$ 。

[0131] 4) 控制优化问题设计

[0132] 在控制优化问题设计中由于有多个参数需要调节与标定，为了简化标定过程，首先定义系统的状态向量为 $x = [x_1, x_2]^T = [\beta/\beta_{up}, \gamma/\gamma_{up}]^T$ 。相应地该系统的控制输入也可被定义为归一化的形式 $u = [u_1, u_2]^T = [\Delta F_{yr}, \Delta M_z/\Delta M_{max}]^T$ ，其中 $\Delta M_{max}$ 表示附加横摆力矩的最大值。之后，再结合离散化后的系统方程便可得到面向预测控制器设计的车辆模型为：

$$[0133] \quad \begin{aligned} x_1(k+1) &= T_s \frac{F_{yf}(k) + \tilde{F}_{yr}(k) + u_1(k)}{mV\beta_{up}} + x_1(k) - T_s \frac{\gamma_{up}}{\beta_{up}} x_2(k) \\ x_2(k+1) &= T_s \frac{L_f F_{yf}(k) - L_r [\tilde{F}_{yr}(k) + u_1(k)]}{\gamma_{up} I_z} + x_2(k) + \frac{\Delta M_{max} T_s}{\gamma_{up} I_z} u_2(k) \end{aligned} \quad (7)$$

[0134] 其中的 $T_s$ 表示系统的离散时间。在极限工况下为了提高模型的准确性，前轮的侧向力 $F_{yf}$ 和后轮侧向力的标准部分 $\tilde{F}_{yr}$ 均由式(2)中的非线性轮胎模型进行计算得到。

[0135] 在本发明中的主要目的是为了提升车辆在极限工况下的行驶安全性能，在此基础上还要考虑到车辆的行驶稳定性，因此需要对车辆的质心侧偏角进行限制与约束。基于上述考虑，在此定义每个时刻 $k+1 \leq k_i \leq k+N+1$ 跟踪横摆角速度和跟踪质心侧偏角的目标函数子项为：

$$[0136] \quad \begin{aligned} L_1(k_i) &= (x_2(k_i) - \gamma_{ref}/\gamma_{up})^2 \\ L_2(k_i) &= (x_1(k_i) - \beta_{ref}/\beta_{up})^2 \end{aligned} \quad (8)$$

[0137] 其中的 $N$ 表示预测时域的大小，质心侧偏角的期望值定义为 $\beta_{ref} = 0$ 。当车辆出现一个较大的超过其上限值 $\beta_{up}$ 的质心侧偏角时，车辆将会失去稳定性。所以车辆的质心侧偏角必须被约束在一个安全的范围内，以保证车辆的行驶安全性。基于上述原因，需要在此加入一个强制性的状态约束为 $|x_1(k_i)| \leq 1$ 。此外，控制作用在整个过程中的相互作用也应该被考虑在内。为了在保证横摆角速度跟踪性能的前提下，应该尽量减少控制过程中的能量消耗。同时为了尽量避免轮胎侧向力的饱和，后轮的附加侧向力也应该尽可能的减小。综合考虑上述两点需求，便可定义关于控制量的目标函数子项为：

$$\begin{aligned}
 [0138] \quad L_3(k_i) &= u_1(k_i - 1)^2 \\
 L_4(k_i) &= u_2(k_i - 1)^2
 \end{aligned} \tag{9}$$

[0139] 考虑到执行器有限的执行能力,控制输入的幅值也应被限制在执行器的物理极限内。

[0140] 对于车辆的附加横摆力矩,其主要限制为轮胎的纵向力以及电机的转矩,因此附加横摆力矩应满足的约束为  $|\Delta M_z| \leq \Delta M_{\max}$ 。对于后轮的侧向力,应考虑轮胎的总的侧向力  $F_{yr}$  必须满足物理摩擦极限,因此关于附加后轮侧向力的约束便可定义为:

$$\begin{aligned}
 [0141] \quad \Delta F_{yr,\min} &\leq u_1(k_i) \leq \Delta F_{yr,\max} \\
 \tilde{F}_{yr}(k_i) + \Delta F_{yr,\min} &\geq F_{yr,\min} \\
 \tilde{F}_{yr}(k_i) + \Delta F_{yr,\max} &\leq F_{yr,\max}
 \end{aligned} \tag{10}$$

[0142] 通过控制量  $u_1$  的约束定义可知,该控制量的上限和下限是由车辆的当前运动状态而动态改变的。之后将目标函数以及约束的定义相结合便可得到预测协同控制策略的优化问题为:

$$\begin{aligned}
 [0143] \quad \min J &= \sum_{k_i=k+1}^{k+N+1} [\Gamma_\gamma L_1(k_i) + \Gamma_\beta L_2(k_i) + \Gamma_{u1} L_3(k_i) + \Gamma_{u2} L_4(k_i)] \\
 s.t. \quad & -1 \leq x_1(k_i) \leq 1 \\
 & \Delta F_{yr,\min} \leq u_1(k_i) \leq \Delta F_{yr,\max} \\
 & -1 \leq u_2(k_i) \leq 1
 \end{aligned} \tag{11}$$

[0144] 上述优化问题中的  $\Gamma_\gamma$  和  $\Gamma_\beta$  分别表示横摆角速度跟踪项的权重系数和质心侧偏角跟踪项的权重系数,  $\Gamma_{u1}$  和  $\Gamma_{u2}$  分别表示控制量  $u_1$  和  $u_2$  的权重系数。在构建优化问题后,便可通过求解上述优化问题得到最优控制输入。

[0145] 5) 控制动作生成

[0146] 在本发明中,一共有两种执行器被用于产生控制作用并执行控制输入。其中轮毂电机用于产生附加横摆力矩,主动后轮转角用于产生附加后轮侧向力。在转矩分配中,采用了一种平均分配的方式来产生附加横摆力矩。根据求解优化问题得到的最优控制输入  $u_2^*(k)$ ,便可得到分配至每个电机的转矩为:

$$\begin{aligned}
 [0147] \quad \Delta T_{cfl}(k) &= \Delta T_{crl}(k) = -\frac{u_2^*(k) \Delta M_{\max}}{d} R_e \\
 \Delta T_{cfr}(k) &= \Delta T_{crr}(k) = \frac{u_2^*(k) \Delta M_{\max}}{d} R_e
 \end{aligned} \tag{12}$$

[0148] 其中  $\Delta T_{cfl}$ ,  $\Delta T_{crl}$  分别表示左侧前轮和后轮的附加转矩,  $\Delta T_{cfr}$ ,  $\Delta T_{crr}$  则分别表示右侧前轮和后轮的附加转矩,  $R_e$  表示轮胎有效的滚动半径,  $d$  表示车身宽度。

[0149] 在本发明所设计的预测协同控制方法中,第二个控制量为附加后轮侧向力,因此需要对其进行转化,转化为车辆的后轮主动转角。因此在本发明中首先构建了一个高精度轮胎侧向力MAP表,轮胎的侧向力不仅和车辆的转向角有关,还和车辆的状态有关,例如横摆角速度和质心侧偏角等。为了简化建模过程,同时减少模型误差,在本发明中选择了轮胎

的侧偏角作为中间变量,用于求出对应的主动后轮转角。如图3所示,MAP表的三轴分别为轮胎侧向力、轮胎侧偏角以及垂直载荷,本实施例选择的轮胎模型为255-15R17的轮胎模型,一旦确定了轮胎的垂直载荷以及期望的轮胎侧向力,则相应的轮胎侧偏角便可由查表法得到。在本发明中首先定义期望的轮胎侧向力为标准部分和附加部分之和,即  $F_{yr,ref} = \tilde{F}_{yr} + \Delta F_{yr}$ ,之后再结合轮胎的垂直载荷,便可得到期望的主动后轮转角为:

$$[0150] \quad \delta_{r,ref} = \beta - \frac{L_r}{V} \gamma - \alpha_{r,ref} \quad (13)$$

[0151]  $\beta$ 表示车辆的质心侧偏角, $L_r$ 表示后轴到车辆质心的距离, $V$ 表示车辆的纵向速度, $\gamma$ 表示车辆的横摆角速度, $\alpha_{r,ref}$ 为查表得到的期望的后轮侧偏角。

[0152] 6) 基于极值原理的快速求解算法

[0153] 通过上述过程可知,最优控制输入能够通过求解非线性规划问题的方式来得到。一般情况下,非线性规划问题可通过一些常用的直接迭代法进行求解,例如SQP以及IPOPT等方法。然而这些方法由于过于沉重的计算负担,并不能被应用于车载环境下。为了解决这一问题,本发明中设计了一种基于极值原理的间接迭代方法来提高求解算法的实时性。

[0154] 在车辆行驶过程中,为了保证安全性,需要对质心侧偏角进行约束。但由于极值原理无法直接处理系统的状态约束,因此需要对状态约束进行适当的转化,引入了一个松弛函数为:

$$[0155] \quad \zeta(k_i) = v \left(1 + e^{\kappa(1+x_1(k_i))}\right)^{-1} + v \left(1 + e^{\kappa(1-x_1(k_i))}\right)^{-1} \quad (14)$$

[0156] 其中的 $\kappa$ 表示了松弛函数的敏感度, $v$ 表示松弛函数的收敛值,为一个较大的数,来保证状态被约束在边界内部。如图4所示,当系统状态远离其约束边界时,该松弛函数的值可忽略不计,当其状态接近约束边界时,松弛函数的值会急剧增加。引入松弛函数后,便可得到重新定义的目标函数子项为:

$$[0157] \quad L'_2(k_i) = L_2(k_i) + \zeta(k_i) \quad (15)$$

[0158] 通过上述转化后,原始的约束下的优化问题便可转换为新的无约束优化问题,可表示为如下形式:

$$[0159] \quad \min J = \sum_{k_i=k+1}^{k+N+1} \left[ \Gamma_\gamma L_1(k_i) + \Gamma_\beta L'_2(k_i) + \Gamma_{u1} L_3(k_i) + \Gamma_{u2} L_4(k_i) \right]$$

$$s.t. \quad \Delta F_{yr,min} \leq u_1(k_i) \leq \Delta F_{yr,max} \quad (16)$$

$$-1 \leq u_2(k_i) \leq 1$$

[0160] 在上述过程的基础上,结合式(1)中的系统方程,便可得到在时刻  $k+1 \leq k_i \leq k+N+1$  的哈密顿函数为:

$$[0161] \quad H(x(k_i), u(k_i)) = L_1(k_i) + \Gamma_\beta L'_2(k_i) + \Gamma_{u1} L_3(k_i) + \Gamma_{u2} L_4(k_i)$$

$$+ \lambda_1(k_i) \left( F_1(x(k_i), u_1(k_i)) - \frac{\gamma_{up}}{\beta_{up}} x_2(k_i) \right) \quad (17)$$

$$+ \lambda_2(k_i) \left( F_2(x(k_i), u_2(k_i)) + \frac{\Delta M_{max}}{\gamma_{up} I_z} u_2(k_i) \right)$$

[0162] 其中的子项 $F_1(x(k_i))$ 和 $F_2(x(k_i))$ 分别定义为:

$$F_1(x(k_i)) = \frac{F_{yf}(x(k_i), \delta_f(k)) + F_{yr}(x(k_i), \delta_r(k), u_1(k_i))}{\beta_{up} mV} \quad (18)$$

[0163]

$$F_2(x(k_i)) = \frac{L_f F_{yf}(x(k_i), \delta_f(k)) - L_r F_{yr}(x(k_i), \delta_r(k), u_1(k_i))}{\gamma_{up} I_z}$$

[0164] 式(17)中的 $\lambda(k_i) = [\lambda_1(k_i), \lambda_2(k_i)]^T$ 表示在 $k_i$ 时刻的拉格朗日乘子。根据正则方程 $\dot{\lambda} = -\partial H / \partial x$ 可得到最优必要条件为:

$$[0165] \quad \lambda(k_i) = \lambda(k_i + 1) + \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{k_i+1} T_s \quad (19)$$

[0166] 根据式(16)中的定义可知,该优化问题可被划分为定终端时间、自由终端状态的最优控制问题,因此便可得到终端条件为:

$$[0167] \quad \lambda(k+N+1) = 0 \quad (20)$$

[0168] 若最优控制输入 $u^*(k_i)$ 存在,则必能在每个时刻使得哈密顿函数取得最小值,即在该最优控制输入 $u^*(k_i)$ 作用下,哈密顿函数必须满足:

$$[0169] \quad H(u^*(k_i), \lambda_1^*(k_i), \lambda_2^*(k_i)) \leq H(u(k_i), \lambda_1^*(k_i), \lambda_2^*(k_i)) \quad (21)$$

[0170] 为了根据已知的拉格朗日乘子 $\lambda(k_i)$ 和系统的初始状态 $x(k_i)$ 找到最优控制输入,现将哈密顿函数重新写为如下形式:

$$[0171] \quad H(x(k_i), u(k_i)) = p_1 u_1(k_i)^2 + p_2(k_i) u_1(k_i) + q_1 u_2(k_i)^2 + q_2(k_i) u_2(k_i) + g(x(k_i)) \quad (22)$$

其中的系数分别定义为:

$$[0172] \quad p_1 = \Gamma_{u1}, q_1 = \Gamma_{u2}, p_2 = \frac{\lambda_1}{\beta_{up} mV} - \frac{\lambda_2 L_r}{\gamma_{up} I_z}, q_2 = \frac{\lambda_2 \Delta M_{\max}}{\gamma_{up} I_z} \quad (23)$$

[0173] 定值残差方程可表示为:

$$[0174] \quad \begin{aligned} g(x(k_i)) = & \Gamma_\gamma (x_2(k_i) - \gamma_{ref} / \gamma_{up})^2 + \Gamma_\beta \left( (x_1(k_i) - \beta_{ref} / \beta_{up})^2 + \zeta(k_i) \right) \\ & + \lambda_1(k_i) \left( \frac{F_{yf}(x(k_i), \delta_f(k)) + \tilde{F}_{yr}(x(k_i), \delta_r(k))}{\beta_{up} mV} - \frac{\gamma_{up}}{\beta_{up}} x_2(k_i) \right) \\ & + \lambda_2(k_i) \frac{L_f F_{yf}(x(k_i), \delta_f(k)) - L_r \tilde{F}_{yr}(x(k_i), \delta_r(k))}{\gamma_{up} I_z} \end{aligned} \quad (24)$$

[0175] 通过上述哈密顿函数的定义可知,该函数可被看作为一个以 $u_1$ 和 $u_2$ 为自变量的二元二次函数,此时式(21)中的问题便可等价于寻找该二次函数的最小值。

[0176] 为了求该二元二次函数的极小值,现定义系数如下:

$$[0177] \quad A = \frac{\partial^2 H}{\partial u_1^2} = 2\Gamma_{u1}, B = \frac{\partial^2 H}{\partial u_1 \partial u_2} = 0, C = \frac{\partial^2 H}{\partial u_2^2} = 2\Gamma_{u2} \quad (25)$$

[0178] 在优化问题中,所有的权重系数均大于零。根据二元函数极值定理可知,当 $B^2 - 4AC = -16 \Gamma_{u1} \Gamma_{u2} < 0$ ,且 $A > 0$ 时,该二元函数在其驻点处取得极小值。因此可以证明该哈密顿

函数在其驻点  $\frac{\partial H}{\partial u_1} = 0, \frac{\partial H}{\partial u_2} = 0$  处取得极小值。此外还要考虑到车辆执行器的约束,因此在每一时刻的显式最优控制输入可表示为:

$$[0179] \quad u_1(k_i) = \begin{cases} \Delta F_{yr,min}, & \text{if } -\frac{p_2(k_i)}{2p_1} \leq \Delta F_{yr,min} \\ -\frac{p_2(k_i)}{2p_1}, & \text{if } \Delta F_{yr,min} < -\frac{p_2(k_i)}{2p_1} < \Delta F_{yr,max} \\ \Delta F_{yr,max}, & \text{if } -\frac{p_2(k_i)}{2p_1} \geq \Delta F_{yr,max}. \end{cases} \quad (26)$$

$$u_2(k_i) = \begin{cases} -1, & \text{if } -\frac{q_2(k_i)}{2q_1} \leq -1 \\ -\frac{q_2(k_i)}{2q_1}, & \text{if } -1 < -\frac{q_2(k_i)}{2q_1} < 1 \\ 1, & \text{if } -\frac{q_2(k_i)}{2q_1} \geq 1. \end{cases}$$

[0180] 7) 基于粒子群优化的最优拉格朗日乘子搜索算法

[0181] 通过上述分析可知,在每一时刻的最优控制输入求解问题能够被转化为一个在已知的初始条件  $\lambda(k_i)$  和  $x(k_i)$  下的多项式函数的极值求解问题。之后,若能够找到最优的拉格朗日乘子初始值  $\lambda^*(k)$ , 并使其使其满足终端条件:

$$[0182] \quad \lambda^*(k) = \arg \min_{\lambda(k) \in \mathbb{R}^2} \|\lambda(k+N+1)\|, \quad (27)$$

[0183] 则最优控制输入序列  $(u^*(k), \dots, u^*(k+N))$  便可通过显式的迭代方式获得。为了找到满足上述条件的最优拉格朗日乘子初值,在本发明中采用了基于粒子群优化的搜索方式,其算法参数分别为粒子个数  $n=10$ , 最大迭代次数  $I_{max}=20$ , 最小迭代次数  $I_{min}=5$ , 惯性因子  $C_1=0.5$  个体学习因子  $C_s=2$ , 群体学习因子  $C_g=2$ , 容差  $\epsilon=0.5$ 。搜索过程可表示为:

[0184] (1) 种群初始化

[0185] 首先给定初始点的位置,若是控制算法的第一次运行,则给定初始点位置为  $(0, 0)$ , 否则继承上一次迭代的最优值作为初始点。之后在初始点附近生成10个初始种群粒子, 粒子位置  $P_i (i=1, \dots, n)$  均匀分布在初始点的  $[-0.5, 0.5]$  范围内。对于初始点的速度,令粒子的速度  $V_i (i=1, \dots, n)$  均匀分布在  $[-5, 5]$  之内。之后按照图5所示的迭代计算过程:根据在时刻  $k_i$  的状态通过式 (23) - (26) 得到的最优控制输入的解析解,再由如式 (7)、(17) - (19) 所示迭代关系,对该初始种群中的粒子进行收敛值计算,计算完成后找出全体种群粒子中的最优点  $P_{b,g}$  和最差点  $P_{w,g}$ , 并分别记录对应的收敛值。此外,在初始化过程中,设定每个粒子的历史最优点  $P_{b,i} (i=1, \dots, n)$  为当前的初始位置点。同时定义当前迭代次数为  $I_c=0$ 。

[0186] (2) 粒子种群更新

[0187] 根据每个粒子的历史最优点个全体粒子种群的历史最优点进行速度和位置更新,其更新过程可表示为:

$$\begin{aligned}
 [0188] \quad & V_i = C_i V_i + C_s \text{random}(0,1)(P_{b,i} - P_i) + C_g \text{random}(0,1)(P_{b,g} - P_i) \\
 & P_i = P_i + V_i
 \end{aligned} \tag{28}$$

[0189] 其中random(0,1)表示一个在(0,1)之间的随机数。

[0190] (3) 粒子种群收敛值更新

[0191] 将更新后的粒子群重新按照图5所示的迭代过程进行收敛值得计算。在计算过程中,若第*i*个粒子的收敛值小于第*i*个粒子当前的最优值,则更新 $P_{b,i}$  ( $i=1, \dots, n$ )的位置为当前的粒子位置,否则仍保持 $P_{b,i}$  ( $i=1, \dots, n$ )的位置不变。在所有粒子收敛值计算完成后,更新群体最优点 $P_{b,g}$ 为当前所有粒子收敛值中最小的粒子的位置,更新群体最差点 $P_{w,g}$ 为当前所有粒子收敛值中最大的粒子的位置。令当前迭代次数增加一次,即 $I_c = I_c + 1$ 。

[0192] (4) 终止条件判断

[0193] 为了保证算法的求解效果,同时避免陷入无限循环,设定如下两个终止条件:

$$\begin{aligned}
 [0194] \quad & \lambda(P_{w,g}) > \lambda(P_{b,g}) + \varepsilon \text{ and } I_c < I_{\max} \\
 & I_c < I_{\min}
 \end{aligned} \tag{29}$$

[0195] 其中 $\lambda(P_{b,g})$ 和 $\lambda(P_{w,g})$ 分别表示在在群体最优点和群体最差点作为拉格朗日乘子初始值时,按照图5迭代得到的最终收敛值。第(3)步结束后,对上述两个条件进行判断,若满足其中一个条件,则表示搜索过程未完成,则返回第(2)步继续迭代;若上述两个条件均不满足,则表示搜索结束,此时输出当前的群体最优点 $P_{b,g}$ 作为最优的拉格朗日乘子初始值。

[0196] 8) 仿真实验验证与对比

[0197] 在本实施例中,采用了MATLAB/CarSim联合仿真的形式对所提出的协同控制方法的有效性进行验证。车辆的参数如表1所示

[0198] 表1: 车辆模型参数

符号	描述	数值	单位
m	车辆整备质量	1270	[kg]
$I_z$	车辆绕质心的转动惯量	1536.7	[kg · m <sup>2</sup> ]
$L_f$	车辆前半轴距	1.05	[m]
$L_r$	车辆后半轴距	1.895	[m]
$C_f$	前轮侧偏刚度	135000	[N/rad]
$C_r$	后轮侧偏刚度	85000	[N/rad]
$R_e$	轮胎滚动半径	0.325	[m]
$\mu$	路面摩擦系数	0.35	/

[0200] 在预测控制优化问题方面,其权重参数设定分别为 $\Gamma_\gamma = 1.55$ ,  $\Gamma_\beta = 0.63$ ,  $\Gamma_{u1} = 0.13$ ,  $\Gamma_{u2} = 0.18$ ,在控制量约束中其设定为 $\Delta M_{\max} = 800\text{Nm}$ ,采样时间为 $T_s = 0.01\text{s}$ ,预测时域为 $N = 15$ 。

[0201] 双移线工况实验

[0202] 在仿真实验中,所选择的是双移线工况,车辆速度为80km/h且在整个工况中保持不变。

[0203] 首先对比传统的基于IPOPT的直接求解法与本发明提出的基于PMP的快速求解算

法的求解时间。IPOPT算法和PMP算法的求解时间分别在图6和图7中给出,从图中可以看到,随着预测时域的增加,二者的求解时间均会增加。但在相同的预测时域下,本发明所设计的基于PMP的快速求解算法的求解时间要远远小于传统IPOPT算法的求解时间。此外,当优化问题较为复杂时,例如在第4秒到第11秒期间,本发明所设计的快速实时求解算法的求解时间可比IPOPT算法的求解时间快约十倍。上述两种算法的平均计算时间在图8中给出,可以看到随着预测时域的增加,基于IPOPT算法的平均求解时间呈指数级急剧增长,而相比之下,本发明提出的基于PMP的求解算法则随着预测时域的增加呈线性增长。从瞬态和平均求解时间可以看出,本发明中所提出的基于PMP的快速求解算法具有更好的实时性,能够在车载环境下及时求解出控制量,能够大幅提升车辆的行驶安全性。

[0204] 车辆的横摆角速度跟踪效果以及质心侧偏角的抑制效果均在图9中给出,可以看到本发明提出的控制方案能够准确跟踪车辆的期望横摆角速度,在极限工况下能够大幅提升车辆的行驶安全性。而当控制方法关闭时,可以看到车辆出现了一个很大的质心侧偏角,在该质心侧偏角的作用下,车辆将失去稳定性,并进一步引发事故的发生。从仿真实验的控制效果中还证明了本发明所设计的快速求解算法在求解效果上能够和传统的IPOPT相媲美,证明了求解算法具有较高的有效性。

[0205] 综上所述,通过仿真实验首先证明了相比于传统的求解算法本发明所设计的快速求解算法能够大幅提升求解速度,使得在车载控制器中应用非线性预测协同控制算法成为了可能。另一方面,通过仿真还证明了本发明所设计的极限工况下四轮独立驱动与转向汽车预测协同控制方法的有效性,能够在极限工况有效提高车辆的安全性,保证车辆的行驶安全。

[0206] 以上详细描述了本发明的较佳具体实施例。应当理解,本领域的普通技术人员无需创造性劳动就可以根据本发明的构思做出诸多修改和变化。因此,凡本技术领域中技术人员依本发明的构思在现有技术的基础上通过逻辑分析、推理或者有限的实验可以得到的技术方案,皆应在由权利要求书所确定的保护范围内。

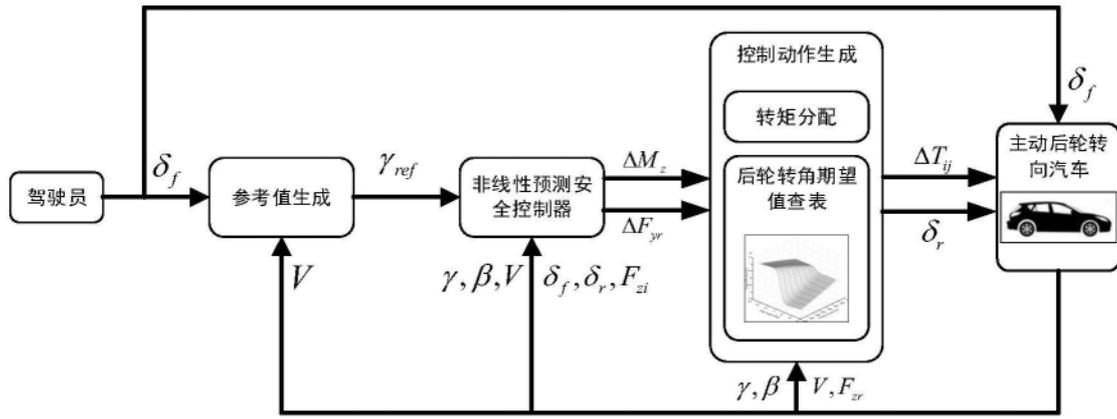


图1

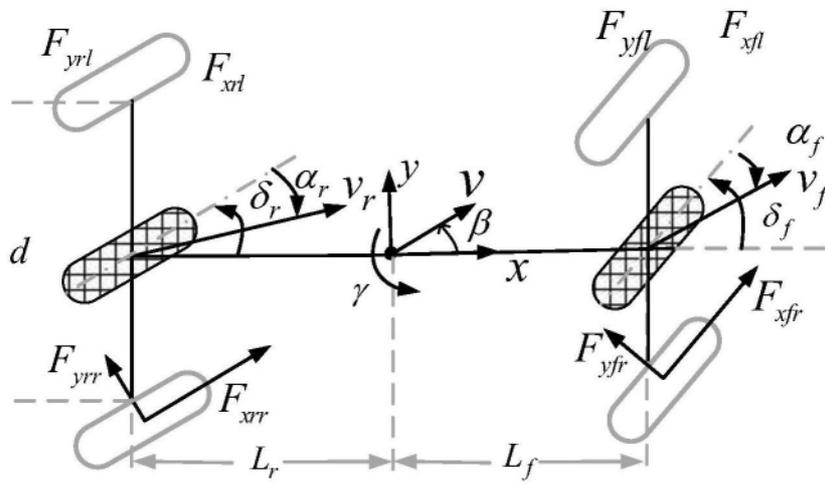


图2

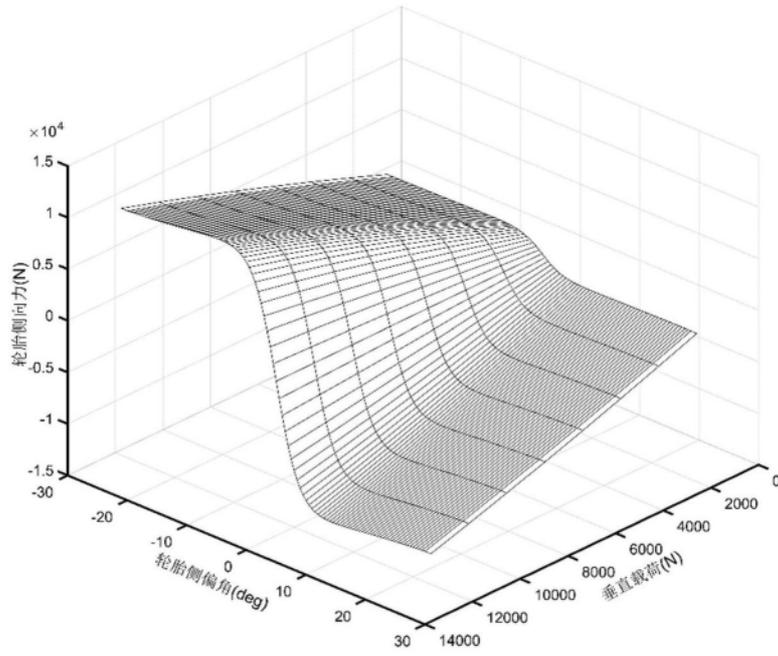


图3

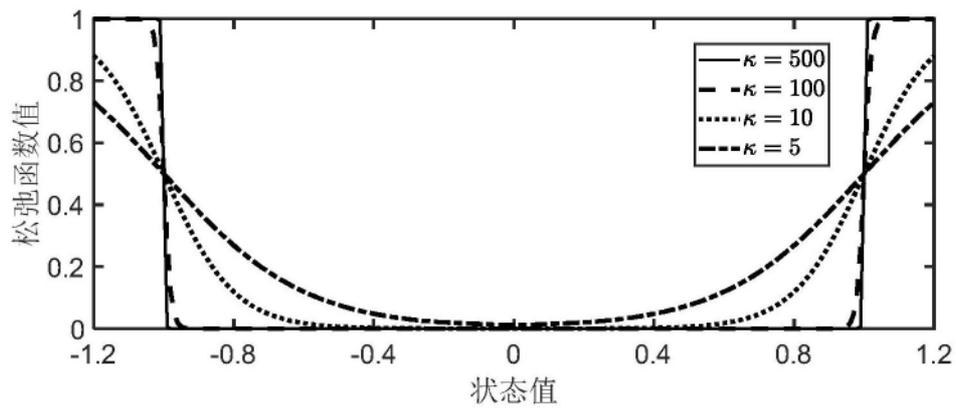


图4

$$\lambda_1(k), \lambda_2(k), x(k) \Rightarrow u(k) \Rightarrow \lambda_1(k+1), \lambda_2(k+1), x(k+1) \Rightarrow u(k+1)$$

$$\Rightarrow \dots \left( \lambda_1(k_i), \lambda_2(k_i), x(k_i) \Rightarrow u(k_i) \right) \Rightarrow \dots \lambda_1(k+N+1), \lambda_2(k+N+1)$$

图5

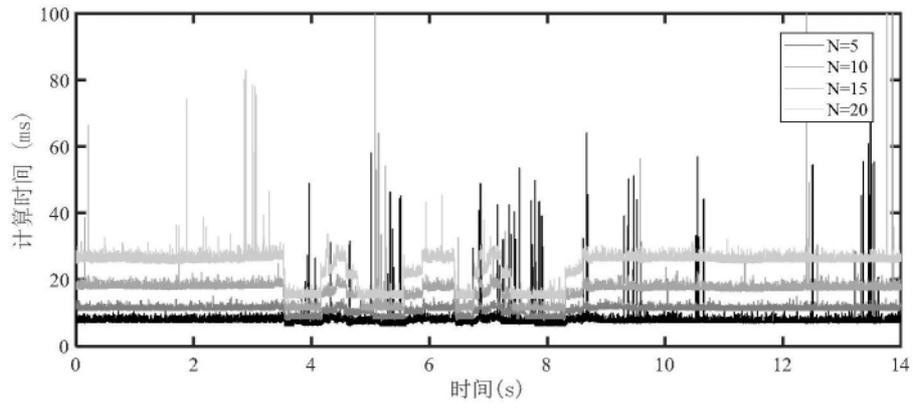


图6

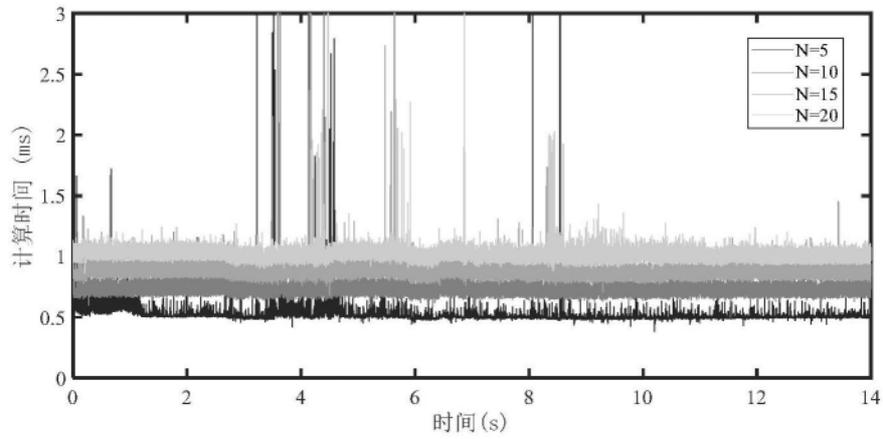


图7

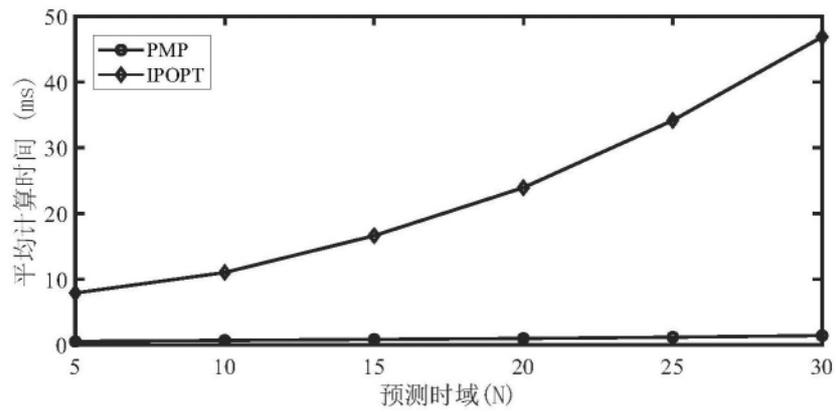


图8

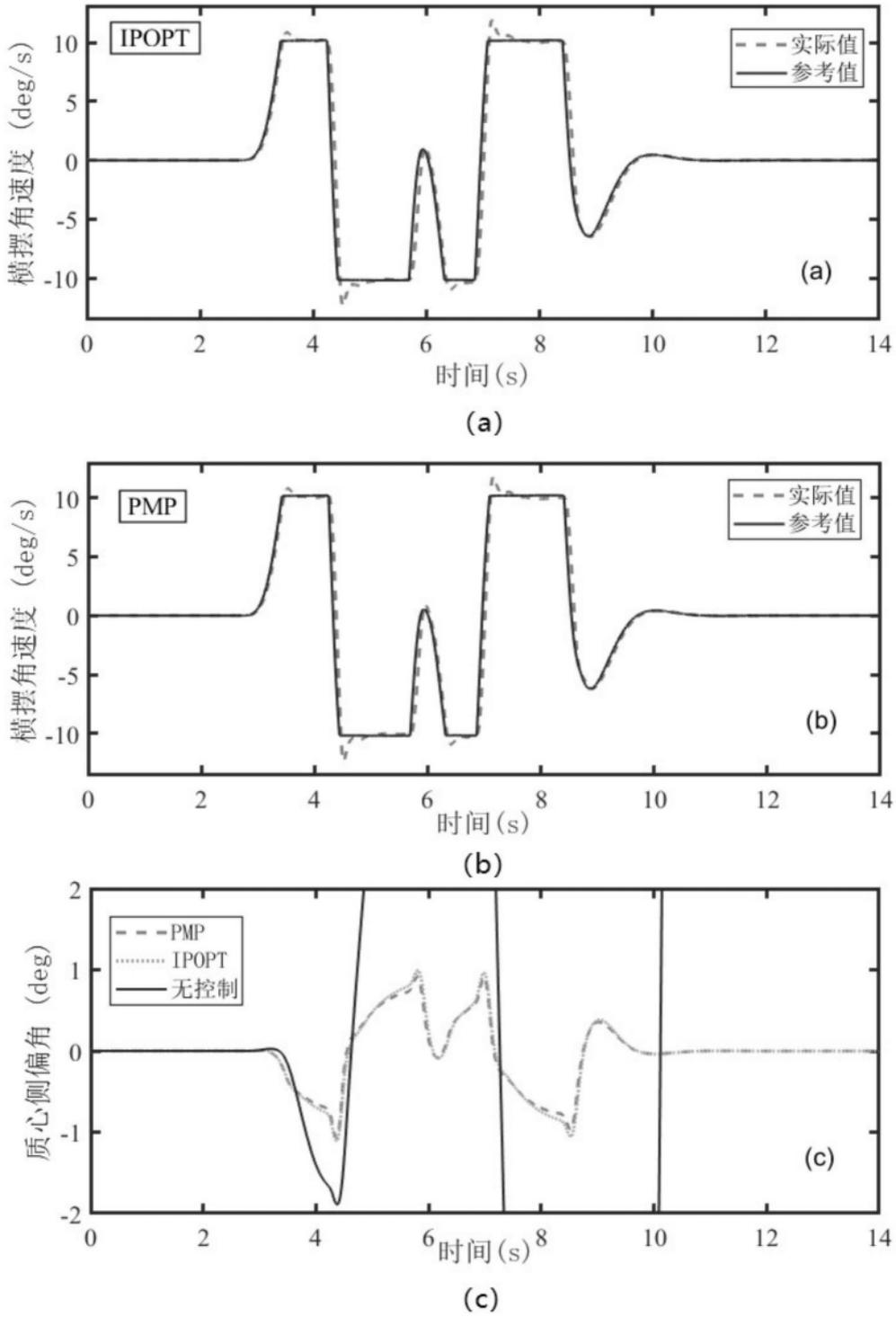


图9